



# Danno da irradiazione elettronica sul tungsteno e sua caratterizzazione mediante spettroscopia di annichilamento positronico.

**Borgognoni F. <sup>(1)</sup>, Ferragut R. <sup>(2)</sup>, Toso V. <sup>(2)</sup>, Vadrucci M. <sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Laboratorio Acceleratori di Particelle e Applicazioni Medicali, ENEA Frascati, RM

<sup>(2)</sup> L-NESS, Como e Dipartimento di Fisica, Politecnico di Milano



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile

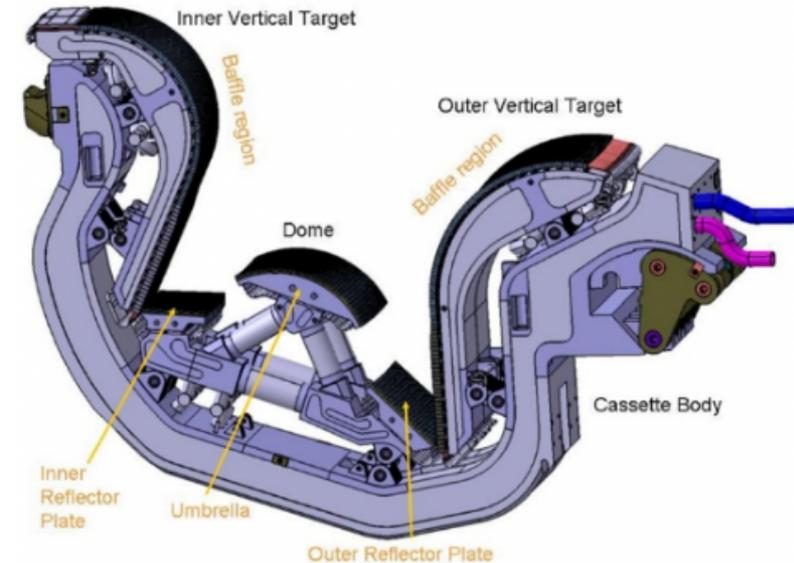
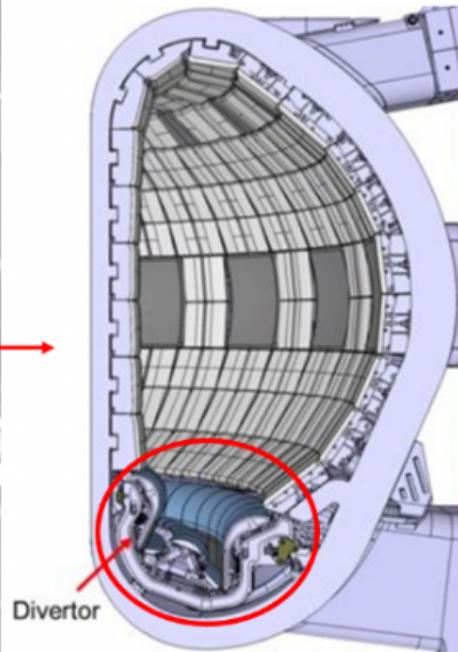
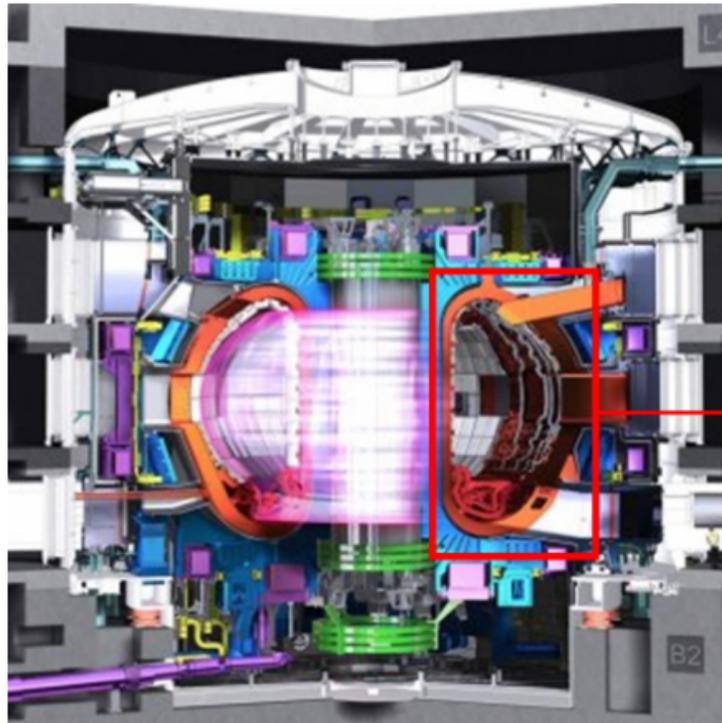


**POLITECNICO**  
MILANO 1863

# International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

Il progetto ITER si propone di realizzare un reattore sperimentale a fusione nucleare in grado di dimostrare anche di poter produrre più potenza di quella richiesta per riscaldare il plasma stesso:

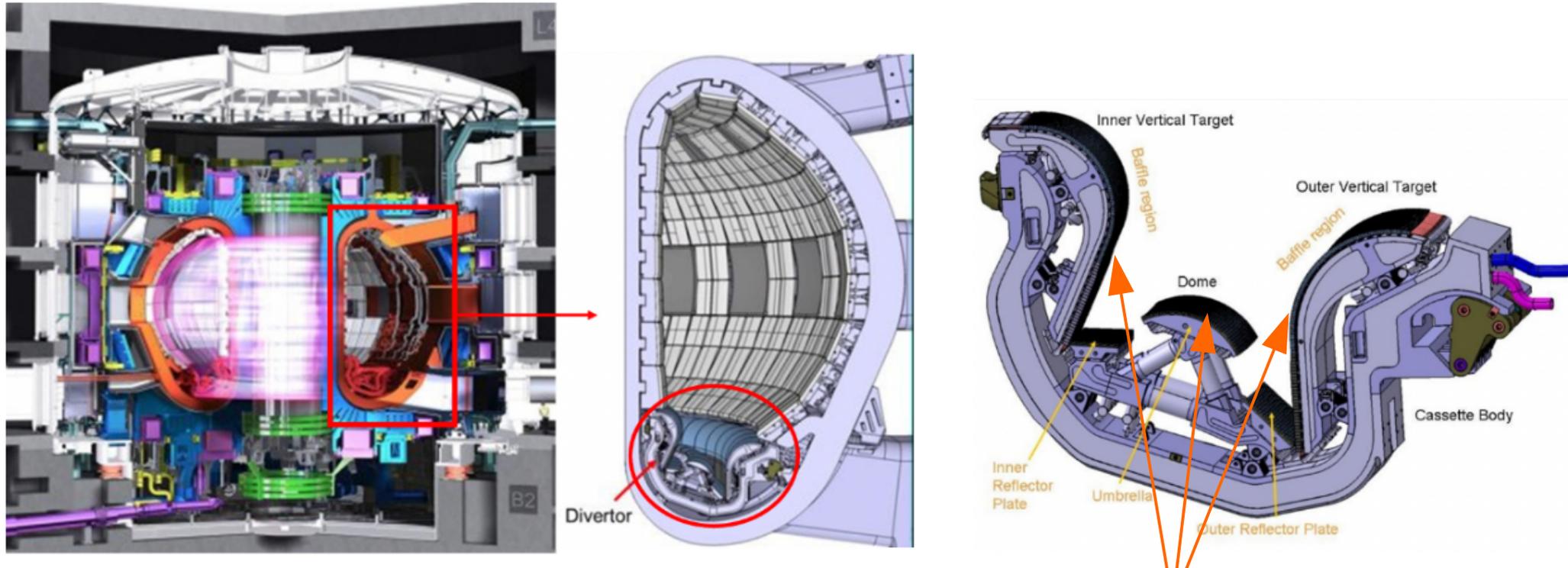
- Reazione:  $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$
- Plasma di deuterio e trizio a temperature  $> 10^8$  °C



# International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

Il progetto ITER si propone di realizzare un reattore sperimentale a fusione nucleare in grado di dimostrare anche di poter produrre più potenza di quella richiesta per riscaldare il plasma stesso:

- Reazione:  $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$
- Plasma di deuterio e trizio a temperature  $> 10^8$  °C



Il tungsteno è il principale candidato come materiale di Plasma Facing Components:

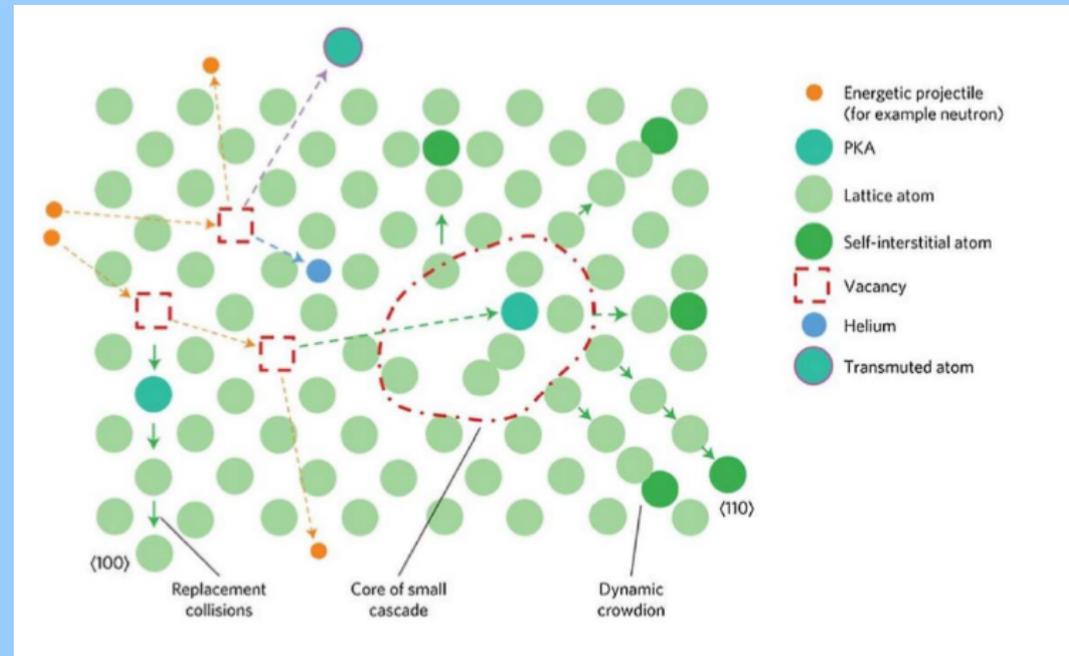
- Elevati carichi termici
- Forte irraggiamento da neutroni ed altri elementi

# Studio dei difetti del tungsteno del divertore

Il tungsteno è soggetto a intenso irraggiamento ed elevati carichi termici



Produzione di difetti reticolari e conseguente usura dei Plasma Facing Components.

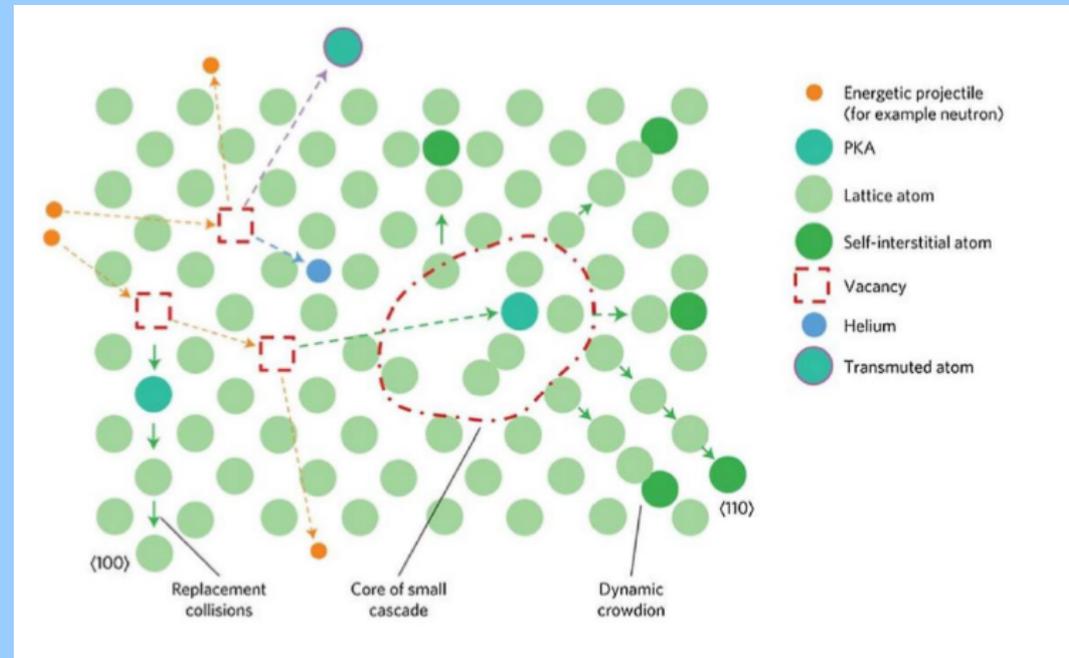


# Studio dei difetti del tungsteno del divertore

Il tungsteno è soggetto a intenso irraggiamento ed elevati carichi termici



Produzione di difetti reticolari e conseguente usura dei Plasma Facing Components.



Conoscere come evolvono i difetti dà informazioni sull'inventario di trizio adsorbito nei difetti del materiale.

L'irraggiamento elettronico dei campioni simula la creazione dei difetti più semplici del reticolo cristallino (Frenkel pairs) che si possono avere nel PFC irraggiato nella camera del plasma del reattore.

Irraggiamento eseguito presso il LINAC REX dell'ENEA Frascati:

Energia  $5MeV$   
Corrente  $140mA$

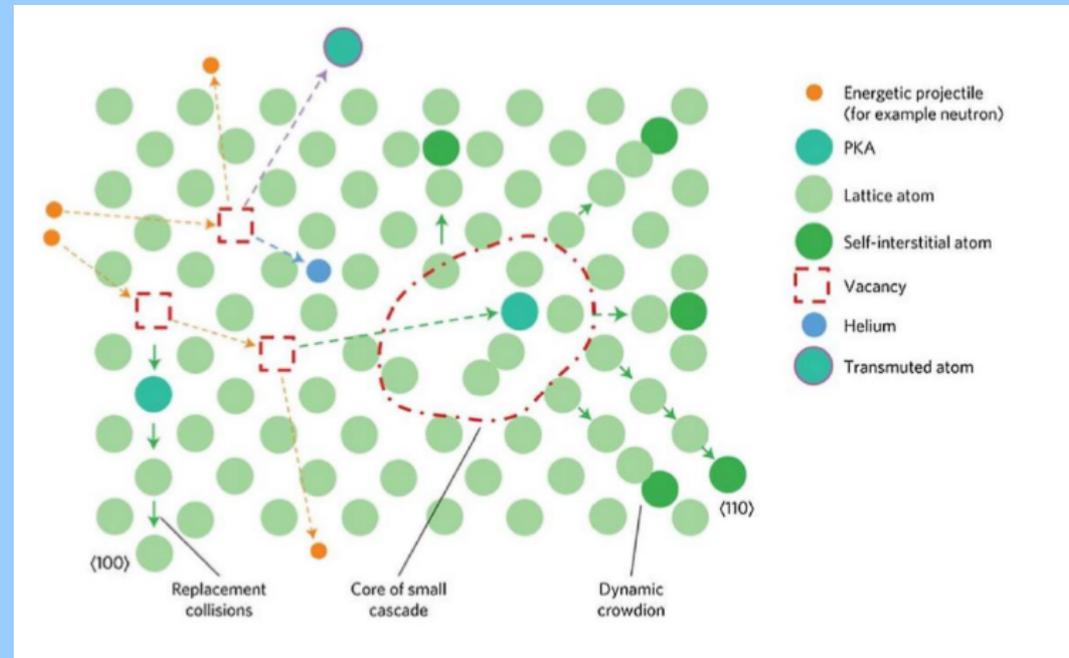
Durata impulsi  $3\mu s$   
Frequenza di ripetizione  $20Hz$

# Studio dei difetti del tungsteno del divertore

Il tungsteno è soggetto a intenso irraggiamento ed elevati carichi termici



Produzione di difetti reticolari e conseguente usura dei Plasma Facing Components.



Conoscere come evolvono i difetti dà informazioni sull'inventario di trizio adsorbito nei difetti del materiale.

L'irraggiamento elettronico dei campioni simula la creazione dei difetti più semplici del reticolo cristallino (Frenkel pairs) che si possono avere nel PFC irraggiato nella camera del plasma del reattore.

Irraggiamento eseguito presso il LINAC REX dell'ENEA Frascati:

Energia  $5MeV$

Corrente  $140mA$

Durata impulsi  $3\mu s$

Frequenza di ripetizione  $20Hz$

Campioni analizzati:

1) Tungsteno del vertical target non irraggiato ed irraggiato 10 e 20h

1) Tungsteno monocristallino di riferimento non irraggiato ed irraggiato 10 e 20h

## Tecniche utilizzate:

### 1) PALS: spettroscopia di tempo di vita di annichilazione dei positroni

Il tempo di vita del positrone dipende dalla sovrapposizione tra la densità del positrone e quella elettronica nel sito di annichilazione.

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \pi r_0^2 c \int |\psi^+|^2 \rho_- \gamma dx$$

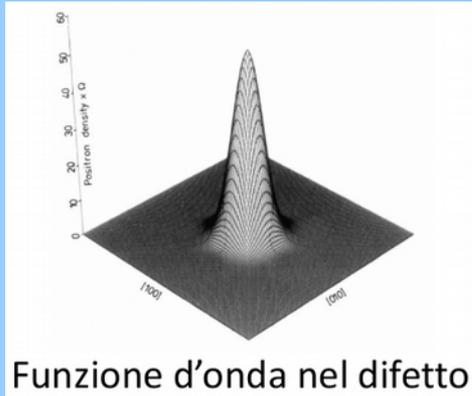
# Tecniche utilizzate:

## 1) PALS: spettroscopia di tempo di vita di annichilazione dei positroni

Il tempo di vita del positrone dipende dalla sovrapposizione tra la densità del positrone e quella elettronica nel sito di annichilazione.

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \pi r_0^2 c \int |\psi^+|^2 \rho_- \gamma dx$$

A causa delle repulsione coulombiana coi nuclei atomici il positrone si localizza nei difetti:



Minor densità  $e^-$  → Maggior vita media

# Tecniche utilizzate:

## 1) PALS: spettroscopia di tempo di vita di annichilazione dei positroni

Il tempo di vita del positrone dipende dalla sovrapposizione tra la densità del positrone e quella elettronica nel sito di annichilazione.

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \pi r_0^2 c \int |\psi^+|^2 \rho_- \gamma dx$$

A causa delle repulsione coulombiana coi nuclei atomici il positrone si localizza nei difetti:

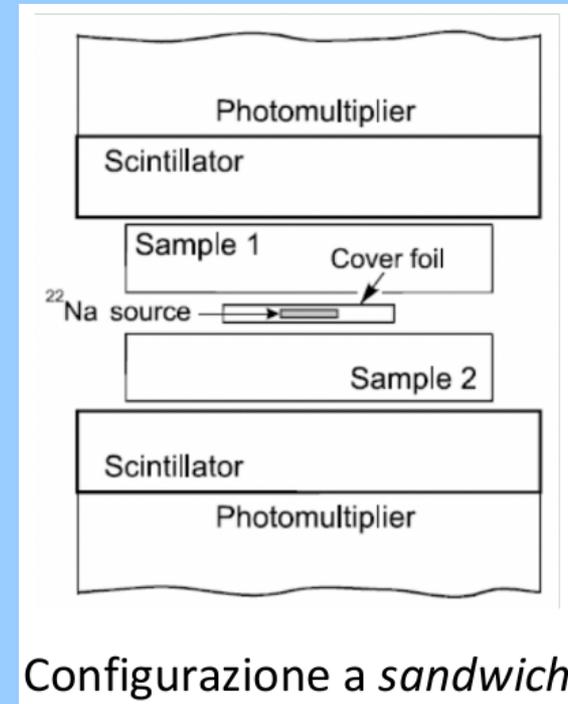


Funzione d'onda nel bulk



Funzione d'onda nel difetto

Minor densità e<sup>-</sup> → Maggiore vita media



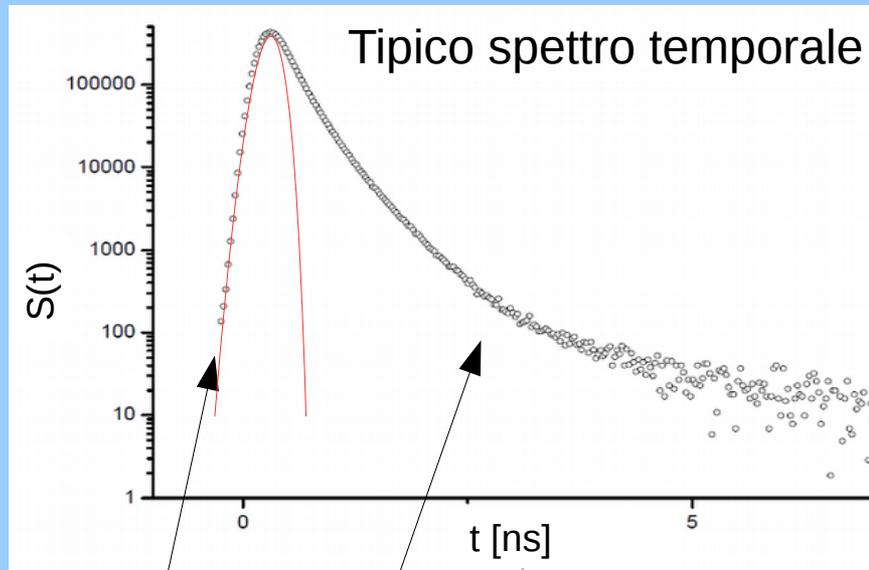
Configurazione a *sandwich*

La sorgente di <sup>22</sup>Na emette un  $\gamma$  “contemporaneamente” al e<sup>+</sup>:  
**segnale di start**

Il e<sup>+</sup> si localizza nel campione ed annichila con un e<sup>-</sup> emettendo  $\gamma$ :  
**segnale di stop**

# PALS: spettroscopia di tempo di vita di annichilazione dei positroni

La differenza temporale tra i 2 segnali coincide con la vita del  $e^+$

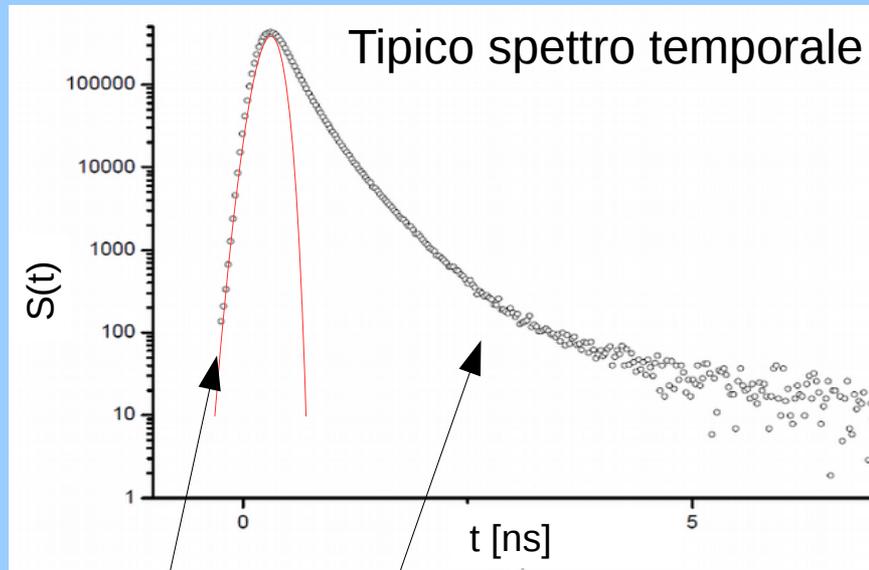


Somma di diversi  
contributi esponenziali:

Risoluzione  
dell'apparato:  
gaussiana  
FWHM = 260 ps

# PALS: spettroscopia di tempo di vita di annichilazione dei positroni

La differenza temporale tra i 2 segnali coincide con la vita del e<sup>+</sup>



Tipico spettro temporale

Deconvoluzione con la risoluzione del sistema:

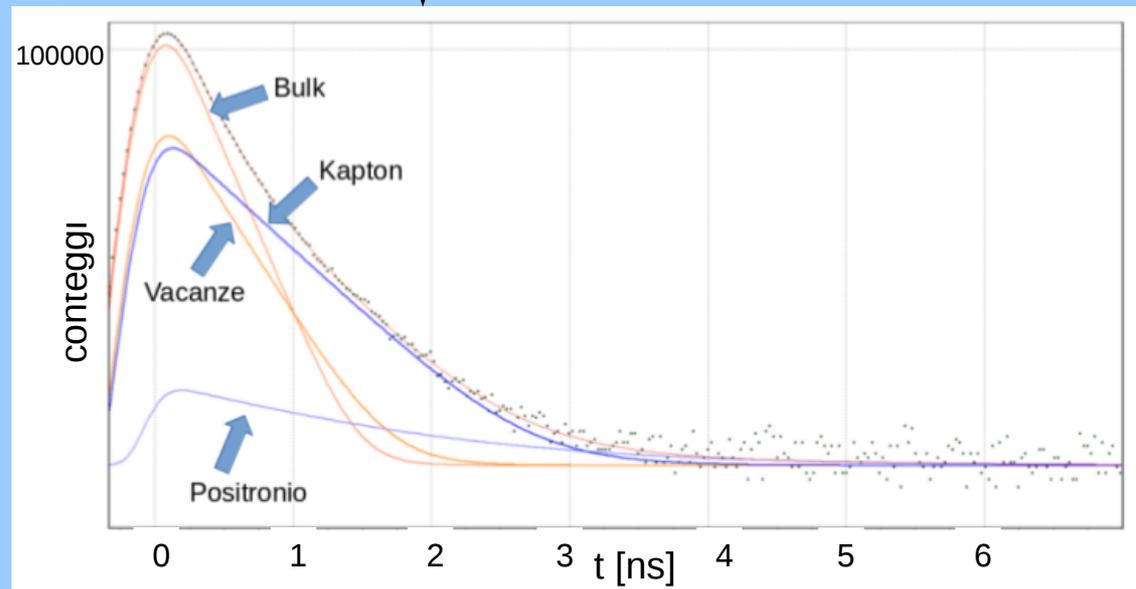
$$S(t) = N(t) * R$$

Scomposizione in componenti:

$$N(t) = \sum_i^{k+1} \frac{I_i}{\tau_i} e^{-t/\tau_i}$$

Somma di diversi contributi esponenziali:

Risoluzione dell'apparato:  
gaussiana  
FWHM = 260 ps



# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     |                                |                       |  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      |                                |                       |  |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      |                                |                       |  |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     |                                |                       |  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      |                                |                       |  |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      |                                |                       |  |

Compatibili con  
lo Standard  
Trapping Model

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     | -                              |                       |  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      | 193 (6)                        |                       |  |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      | 198 (7)                        |                       |  |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     | -                              |                       |  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      | 193 (6)                        |                       |  |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      | 198 (7)                        |                       |  |

Compatibili

Il campione non irraggiato risulta pressochè privo di difetti

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     | -                              | -                     |  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      | 193 (6)                        | 17 (1)                |  |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      | 198 (7)                        | 25 (2)                |  |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     | -                              | -                     |  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      | 193 (6)                        | 17 (1)                |  |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      | 198 (7)                        | 25 (2)                |  |

Incremento difetti con l'irraggiamento

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [cm <sup>-3</sup> ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|---|
| Non irraggiato | 105 (2)                     | -                              | -                     | -   |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      | 193 (6)                        | 17 (1)                | <b>1.1(1) · 10<sup>17</sup></b>                               |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      | 198 (7)                        | 25 (2)                | <b>1.8(2) · 10<sup>17</sup></b>                               |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     | -                              | -                     | -  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      | 193 (6)                        | 17 (1)                | <b><math>1.1(1) \cdot 10^{17}</math></b>                       |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      | 198 (7)                        | 25 (2)                | <b><math>1.8(2) \cdot 10^{17}</math></b>                       |

Tungsteno del divertore:

|                | Tempo di vita mono-vacanze [ps] | Tempo di vita clusters di vacanze (~ 15 vacanze) [ps] | Tempo di vita componente non risolta (Bulk W + dislocazioni) [ps] |
|----------------|---------------------------------|---|---|
| Non irraggiato | F 197                           |   |   |
| Irraggiato 10h | F 197                           |   |   |
| Irraggiato 20h | F 197                           |   |   |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     | -                              | -                     | -  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      | 193 (6)                        | 17 (1)                | $1.1(1) \cdot 10^{17}$   |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      | 198 (7)                        | 25 (2)                | $1.8(2) \cdot 10^{17}$   |

Compatibili

Tungsteno del divertore:

|                | Tempo di vita mono-vacanze [ps] | Tempo di vita clusters di vacanze (~ 15 vacanze) [ps] | Tempo di vita componente non risolta (Bulk W + dislocazioni) [ps] |
|----------------|---------------------------------|---|---|
| Non irraggiato | F 197                           |   |   |
| Irraggiato 10h | F 197                           |   |   |
| Irraggiato 20h | F 197                           |   |   |

Fissato nell'analisi

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     | -                              | -                     | -  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      | 193 (6)                        | 17 (1)                | <b><math>1.1(1) \cdot 10^{17}</math></b>                       |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      | 198 (7)                        | 25 (2)                | <b><math>1.8(2) \cdot 10^{17}</math></b>                       |

Tungsteno del divertore:

|                | Tempo di vita mono-vacanze [ps] | Tempo di vita clusters di vacanze (~ 15 vacanze) [ps] | Tempo di vita componente non risolta (Bulk W + dislocazioni) [ps] |
|----------------|---------------------------------|---|---|
| Non irraggiato | F 197                           | 407 (12)  |   |
| Irraggiato 10h | F 197                           | 438 (14)  |   |
| Irraggiato 20h | F 197                           | 427 (16)  |   |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     | -                              | -                     | -  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      | 193 (6)                        | 17 (1)                | <b><math>1.1(1) \cdot 10^{17}</math></b>                       |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      | 198 (7)                        | 25 (2)                | <b><math>1.8(2) \cdot 10^{17}</math></b>                       |

Tungsteno del divertore:

|                | Tempo di vita mono-vacanze [ps] | Tempo di vita clusters di vacanze (~ 15 vacanze) [ps] | Tempo di vita componente non risolta (Bulk W + dislocazioni) [ps] |
|----------------|---------------------------------|---|---|
| Non irraggiato | F 197                           | 407 (12)  | 130 (3)   |
| Irraggiato 10h | F 197                           | 438 (14)  | 132 (5)   |
| Irraggiato 20h | F 197                           | 427 (16)  | 136 (4)   |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno monocristallino:

|                | Tempo di vita nel bulk [ps] | Tempo di vita nei difetti [ps] | Intensità difetti [%] | Densità difetti [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Non irraggiato | 105 (2)                     | -                              | -                     | -  |
| Irraggiato 10h | 97 (3)                      | 193 (6)                        | 17 (1)                | <b><math>1.1(1) \cdot 10^{17}</math></b>                       |
| Irraggiato 20h | 98 (5)                      | 198 (7)                        | 25 (2)                | <b><math>1.8(2) \cdot 10^{17}</math></b>                       |

Tungsteno del divertore:

|                | Tempo di vita mono-vacanze [ps] | Tempo di vita clusters di vacanze (~ 15 vacanze) [ps] | Tempo di vita componente non risolta (Bulk W + dislocazioni) [ps] |
|----------------|---------------------------------|---|---|
| Non irraggiato | F 197                           | 407 (12)  | 130 (3)   |
| Irraggiato 10h | F 197                           | 438 (14)  | 132 (5)   |
| Irraggiato 20h | F 197                           | 427 (16)  | 136 (4)   |

Compatibili

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno del divertore:

|                | Intensità mono-vacanze [%] | Intensità clusters di vacanze (~ 15 vacanze) [%] | Intensità componente non risolta (Bulk W + dislocazioni) [%] |
|----------------|----------------------------|--|--|
| Non irraggiato | 57 (2)                     |  |  |
| Irraggiato 10h | 59 (2)                     |  |  |
| Irraggiato 20h | 63 (3)                     |  |  |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno del divertore:

|                | Intensità mono-vacanze [%] | Intensità clusters di vacanze (~ 15 vacanze) [%] | Intensità componente non risolta (Bulk W + dislocazioni) [%] |
|----------------|----------------------------|--|--|
| Non irraggiato | 57 (2)                     |  |  |
| Irraggiato 10h | 59 (2)                     |  |  |
| Irraggiato 20h | 63 (3)                     |  |  |

Tendenza di aumento dei difetti di tipo mono-vacanza con l'irraggiamento

Difetti mono-vacanza già presenti nel campione non irraggiato

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno del divertore:

|                | Intensità mono-<br>vacanze [%] | Intensità clusters<br>di vacanze (~ 15<br>vacanze) [%] | Intensità<br>componente non<br>risolta (Bulk W +<br>dislocazioni) [%] |
|----------------|--------------------------------|--|---|
| Non irraggiato | 57 (2)                         | 5.7 (6)  |   |
| Irraggiato 10h | 59 (2)                         | 4.1 (4)  |   |
| Irraggiato 20h | 63 (3)                         | 4.2 (7)  |   |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno del divertore:

|                | Intensità mono-vacanze [%] | Intensità clusters di vacanze (~ 15 vacanze) [%] | Intensità componente non risolta (Bulk W + dislocazioni) [%] |
|----------------|----------------------------|--|--|
| Non irraggiato | 57 (2)                     | 5.7 (6)  |  |
| Irraggiato 10h | 59 (2)                     | 4.1 (4)  |  |
| Irraggiato 20h | 63 (3)                     | 4.2 (7)  |  |

Leggera diminuzione dei clusters con l'irraggiamento (rilassamento della struttura)

Clusters già presenti nel campione non irraggiato (metodi di produzione)

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno del divertore:

|                | Intensità mono-<br>vacanze [%] | Intensità clusters<br>di vacanze (~ 15<br>vacanze) [%] | Intensità<br>componente non<br>risolta (Bulk W +<br>dislocazioni) [%] |
|----------------|--------------------------------|--|---|
| Non irraggiato | 57 (2)                         | 5.7 (6)  | 36 (2)  |
| Irraggiato 10h | 59 (2)                         | 4.1 (4)  | 37 (2)  |
| Irraggiato 20h | 63 (3)                         | 4.2 (7)  | 32 (3)  |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno del divertore:

|                | Intensità mono-vacanze [%] | Intensità clusters di vacanze (~ 15 vacanze) [%] | Intensità componente non risolta (Bulk W + dislocazioni) [%] |
|----------------|----------------------------|--|--|
| Non irraggiato | 57 (2)                     | 5.7 (6)  | 36 (2)   |
| Irraggiato 10h | 59 (2)                     | 4.1 (4)  | 37 (2)   |
| Irraggiato 20h | 63 (3)                     | 4.2 (7)  | 32 (3)   |

|                | Densità mono-vacanze [ $\text{cm}^{-3}$ ] | Densità clusters [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|---|---|
| Non irraggiato | $> 3.7(4) \cdot 10^{17}$                  | $> 1 \cdot 10^{14}$   |
| Irraggiato 10h | $> 4.4(4) \cdot 10^{17}$                  | $> 9 \cdot 10^{13}$   |
| Irraggiato 20h | $> 5.9(6) \cdot 10^{17}$                  | $> 1 \cdot 10^{14}$   |

# Risultati misure con tecnica PALS:

Tungsteno del divertore:

|                | Intensità mono-vacanze [%] | Intensità clusters di vacanze (~ 15 vacanze) [%] | Intensità componente non risolta (Bulk W + dislocazioni) [%] |
|----------------|----------------------------|--|--|
| Non irraggiato | 57 (2)                     | 5.7 (6)  | 36 (2)   |
| Irraggiato 10h | 59 (2)                     | 4.1 (4)  | 37 (2)   |
| Irraggiato 20h | 63 (3)                     | 4.2 (7)  | 32 (3)   |

|                | Densità mono-vacanze [ $\text{cm}^{-3}$ ] | Densità clusters [ $\text{cm}^{-3}$ ] (Standard Trapping Model) |
|----------------|---|---|
| Non irraggiato | $> 3.7(4) \cdot 10^{17}$                  | $> 1 \cdot 10^{14}$   |
| Irraggiato 10h | $> 4.4(4) \cdot 10^{17}$                  | $> 9 \cdot 10^{13}$   |
| Irraggiato 20h | $> 5.9(6) \cdot 10^{17}$                  | $> 1 \cdot 10^{14}$   |

Densità clusters ~1000 volte minore della densità di mono-vacanze

Dimensione clusters ~0.4 nm

# Tecniche utilizzate:

## 2) CDB: Coincidence Doppler Broadening

I  $e^+$  emessi dal  $^{22}\text{Na}$  annichilano con gli  $e^-$  del materiale dopo aver termalizzato:  
 $e^+ + e^- \rightarrow \gamma \gamma$

L'energia dei  $\gamma$  nel sistema di riferimento del laboratorio subisce uno spostamento Doppler causato dal momento  $P_L$  della coppia  $e^+ + e^-$  nella direzione del fotone:

$$E_\gamma = 511 \text{ keV} + P_L c / 2$$

Trascurabile dopo  
termalizzazione



# Tecniche utilizzate:

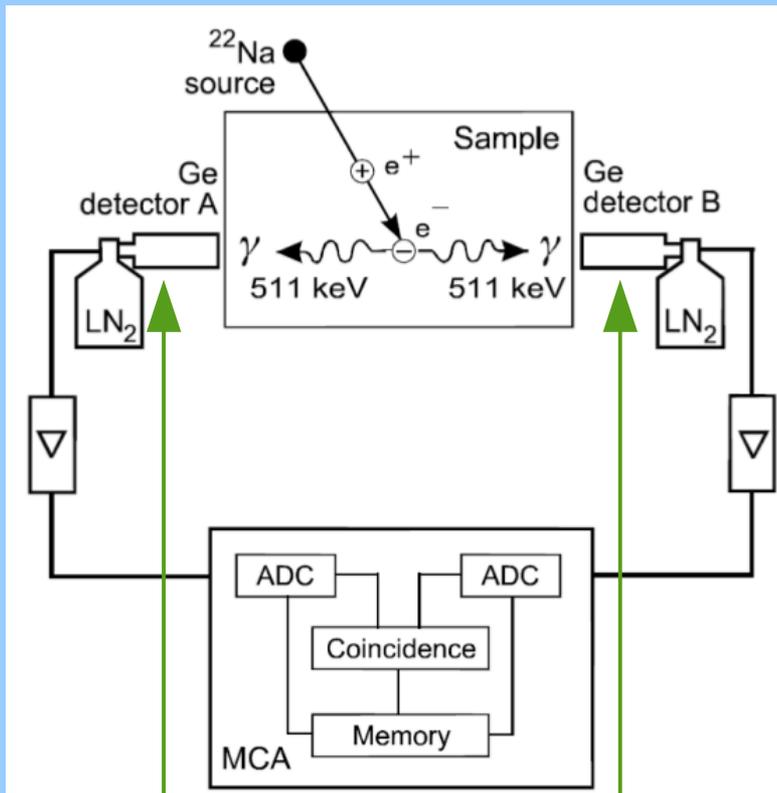
## 2) CDB: Coincidence Doppler Broadening

I  $e^+$  emessi dal  $^{22}\text{Na}$  annichilano con gli  $e^-$  del materiale dopo aver termalizzato:  
 $e^+ + e^- \rightarrow \gamma \gamma$

L'energia dei  $\gamma$  nel sistema di riferimento del laboratorio subisce uno spostamento Doppler causato dal momento  $P_L$  della coppia  $e^+ + e^-$  nella direzione del fotone:

$$E_\gamma = 511 \text{ keV} + P_L c / 2$$

Trascurabile dopo termalizzazione



Rivelatori in coincidenza: miglior rapporto segnale/rumore

# Tecniche utilizzate:

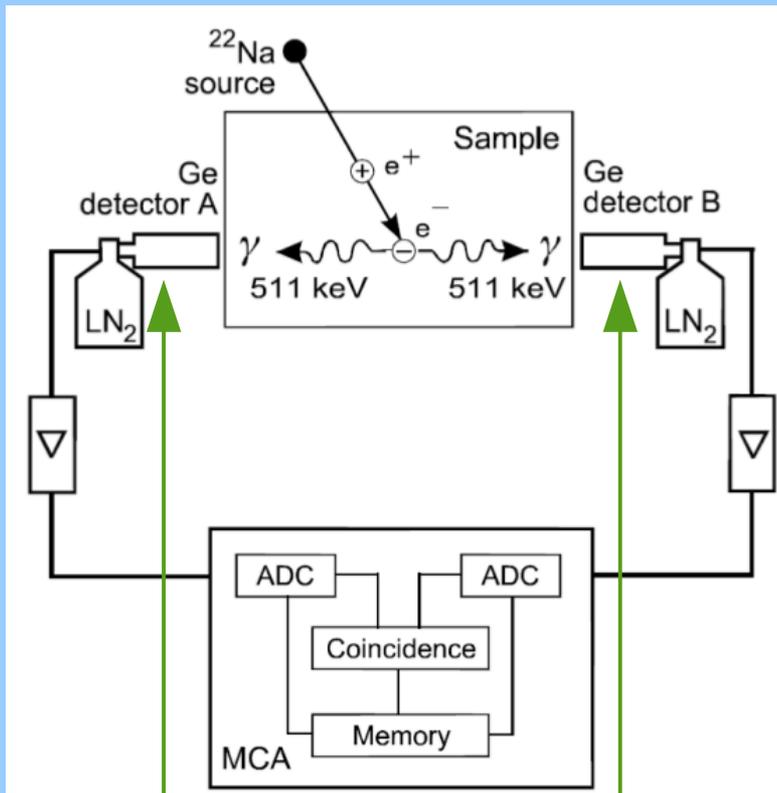
## 2) CDB: Coincidence Doppler Broadening

I  $e^+$  emessi dal  $^{22}\text{Na}$  annichilano con gli  $e^-$  del materiale dopo aver termalizzato:  
 $e^+ + e^- \rightarrow \gamma \gamma$

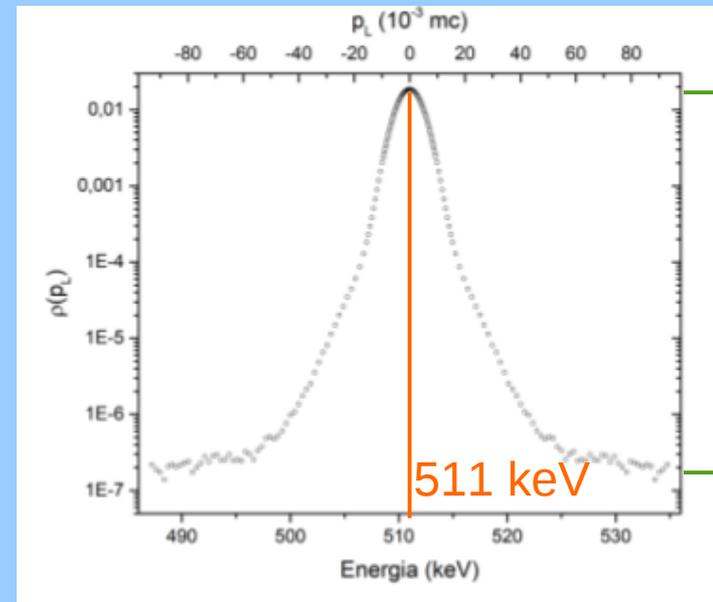
L'energia dei  $\gamma$  nel sistema di riferimento del laboratorio subisce uno spostamento Doppler causato dal momento  $P_L$  della coppia  $e^+ + e^-$  nella direzione del fotone:

$$E_\gamma = 511 \text{ keV} + P_L c / 2$$

Trascurabile dopo termalizzazione



Rivelatori in coincidenza: miglior rapporto segnale/rumore



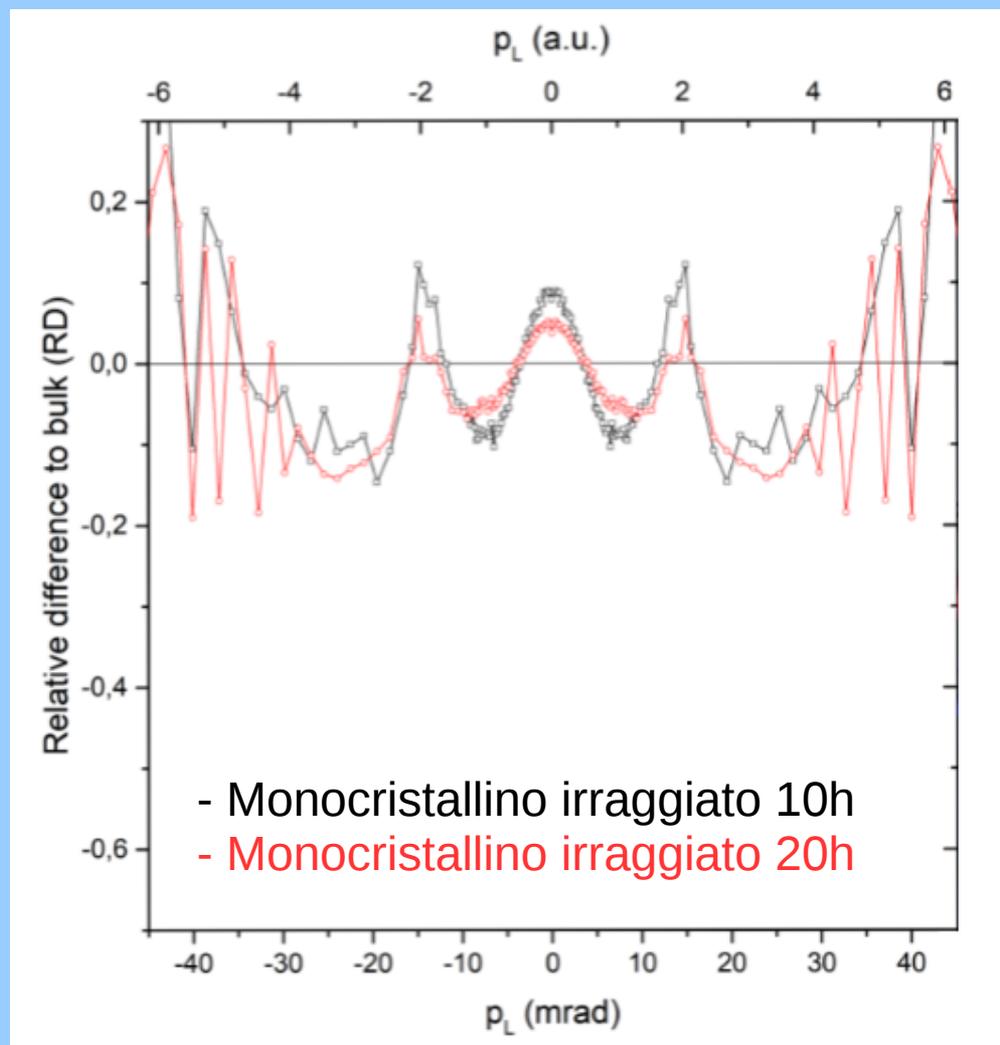
5 ordini di grandezza segnale/fondo

Misurando l'energia del fotone  $E_\gamma$  si può calcolare la distribuzione unidimensionale del momento degli  $e^-$  del materiale.

# Risultati misure con tecnica CDB: tungsteno monocristallino

Grafico delle differenze relative tra i campioni irraggiati  $\rho_c$  e quello di riferimento  $\rho_r$ :

$$RD(p_L) = \frac{\rho_c(p_L) - \rho_r(p_L)}{\rho_r(p_L)}$$

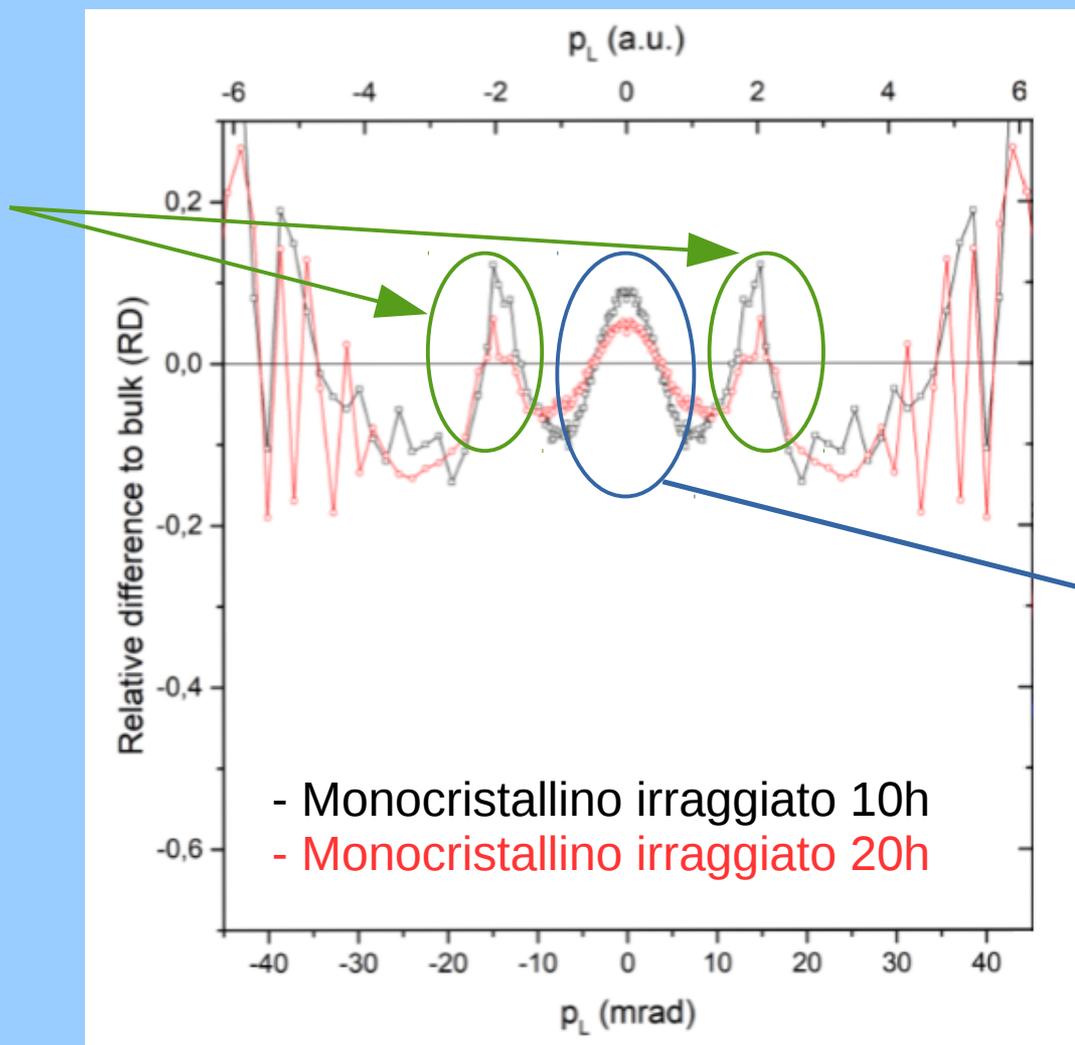


# Risultati misure con tecnica CDB: tungsteno monocristallino

Grafico delle differenze relative tra i campioni irraggiati  $\rho_c$  e quello di riferimento  $\rho_r$ :

$$RD(p_L) = \frac{\rho_c(p_L) - \rho_r(p_L)}{\rho_r(p_L)}$$

Picchi di localizzazione a  $P_L \sim 2$  a.u.



Massimo relativo a basso momento

# Risultati misure con tecnica CDB: tungsteno monocristallino

Grafico delle differenze relative tra i campioni irraggiati  $\rho_c$  e quello di riferimento  $\rho_r$ :

$$RD(p_L) = \frac{\rho_c(p_L) - \rho_r(p_L)}{\rho_r(p_L)}$$

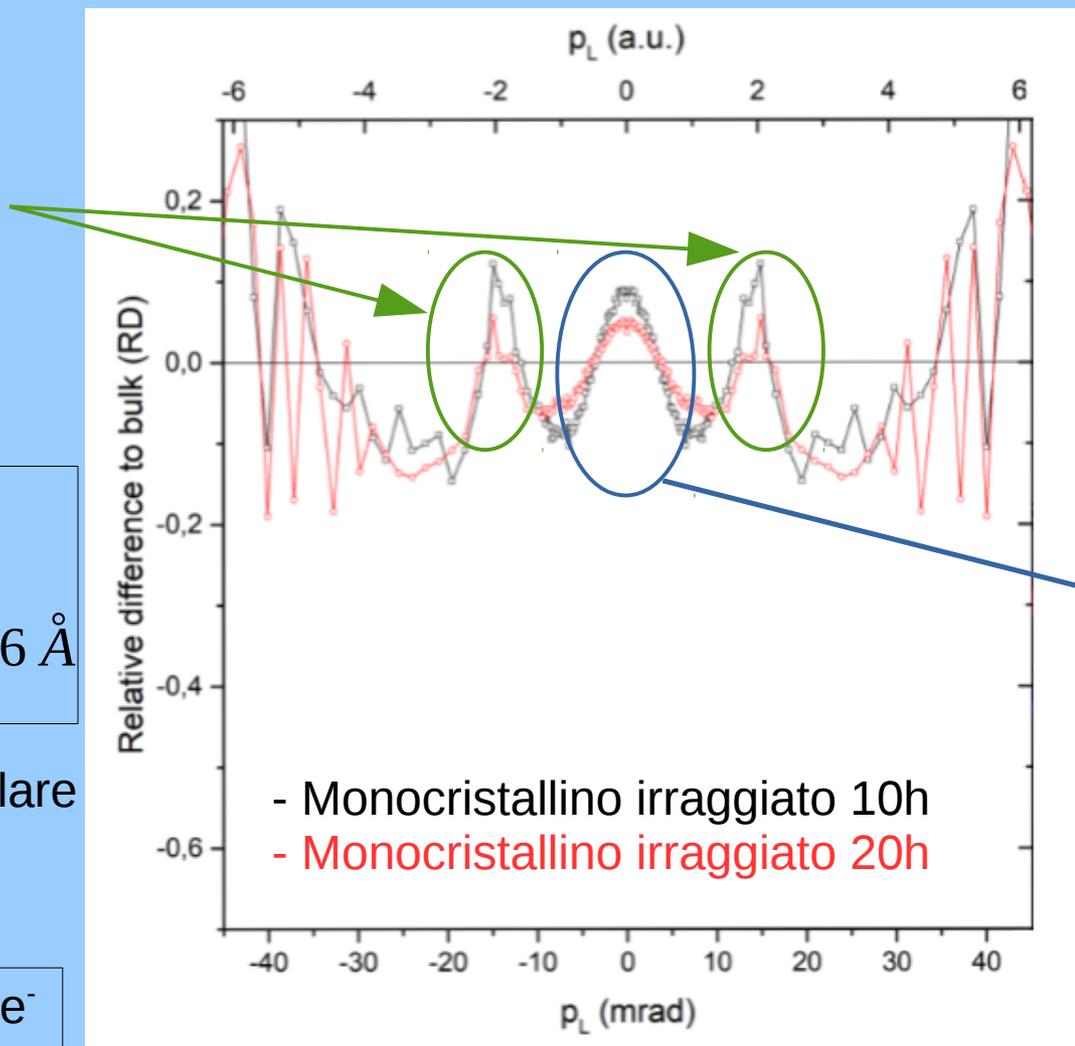
Picchi di localizzazione a  $P_L \sim 2$  a.u.

Confinamento di soli  $e^+$  non possibile:

$$\Delta x \approx \frac{\hbar}{P_L} \approx 0.27 \text{ \AA} \ll 3.16 \text{ \AA}$$

Passo reticolare tungsteno

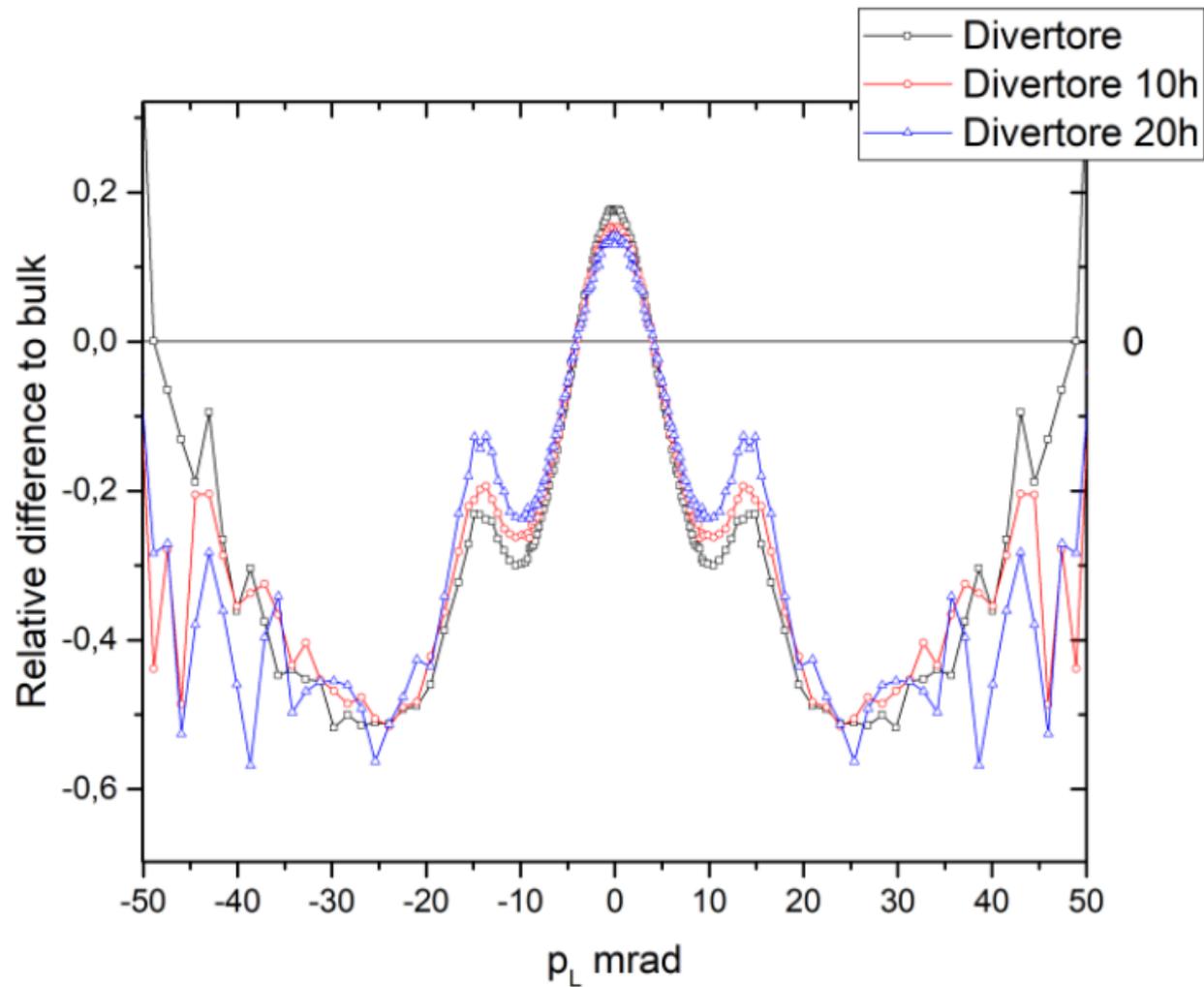
Ipotesi confinamento  $e^+$ ,  $e^-$  in mono-vacanze



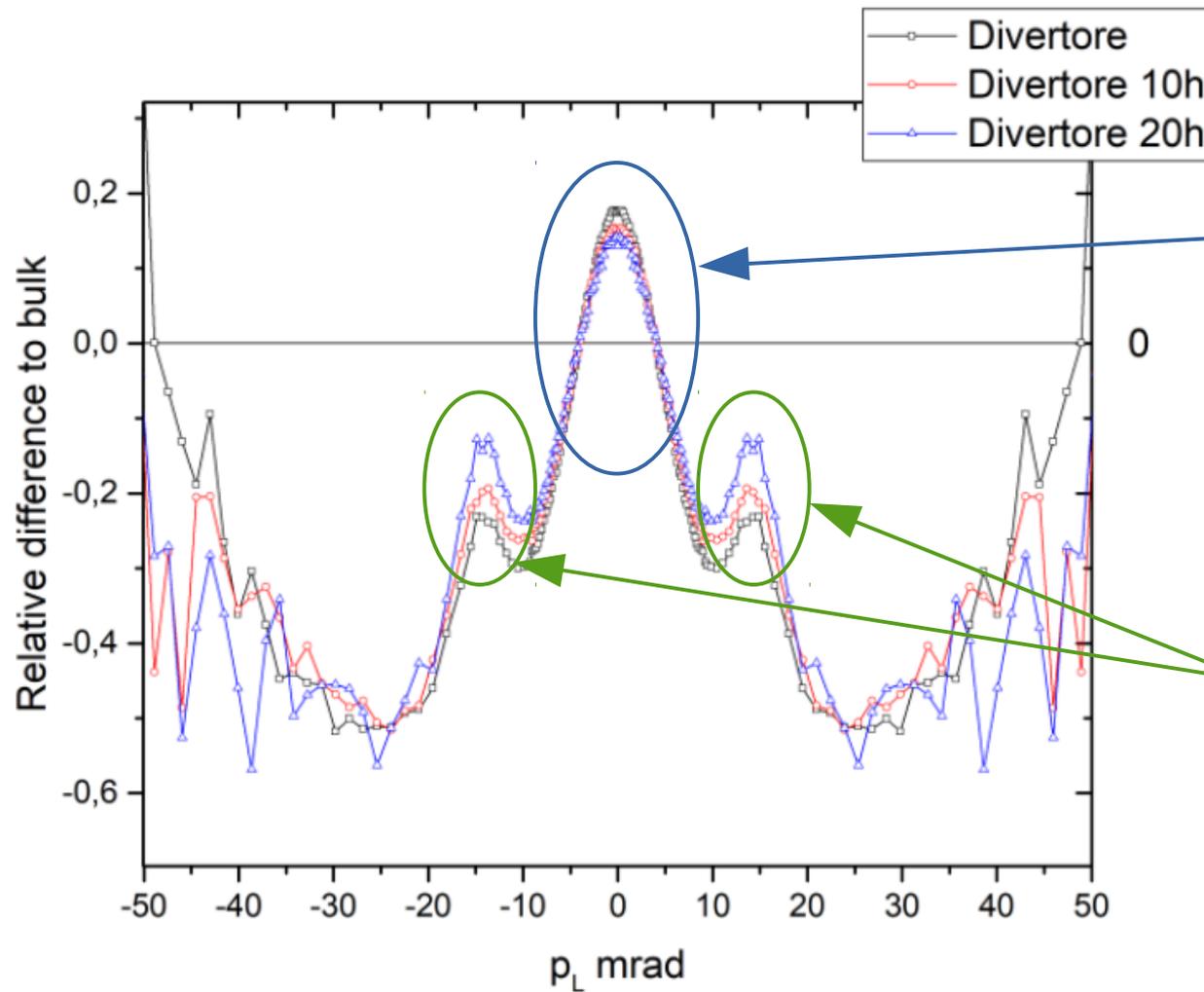
Massimo relativo a basso momento

NOTA: Abbiamo iniziato uno studio con calcolo di Primi Principi per capire la natura di questo tipo di confinamento

# Risultati misure con tecnica CDB: tungsteno del divertore



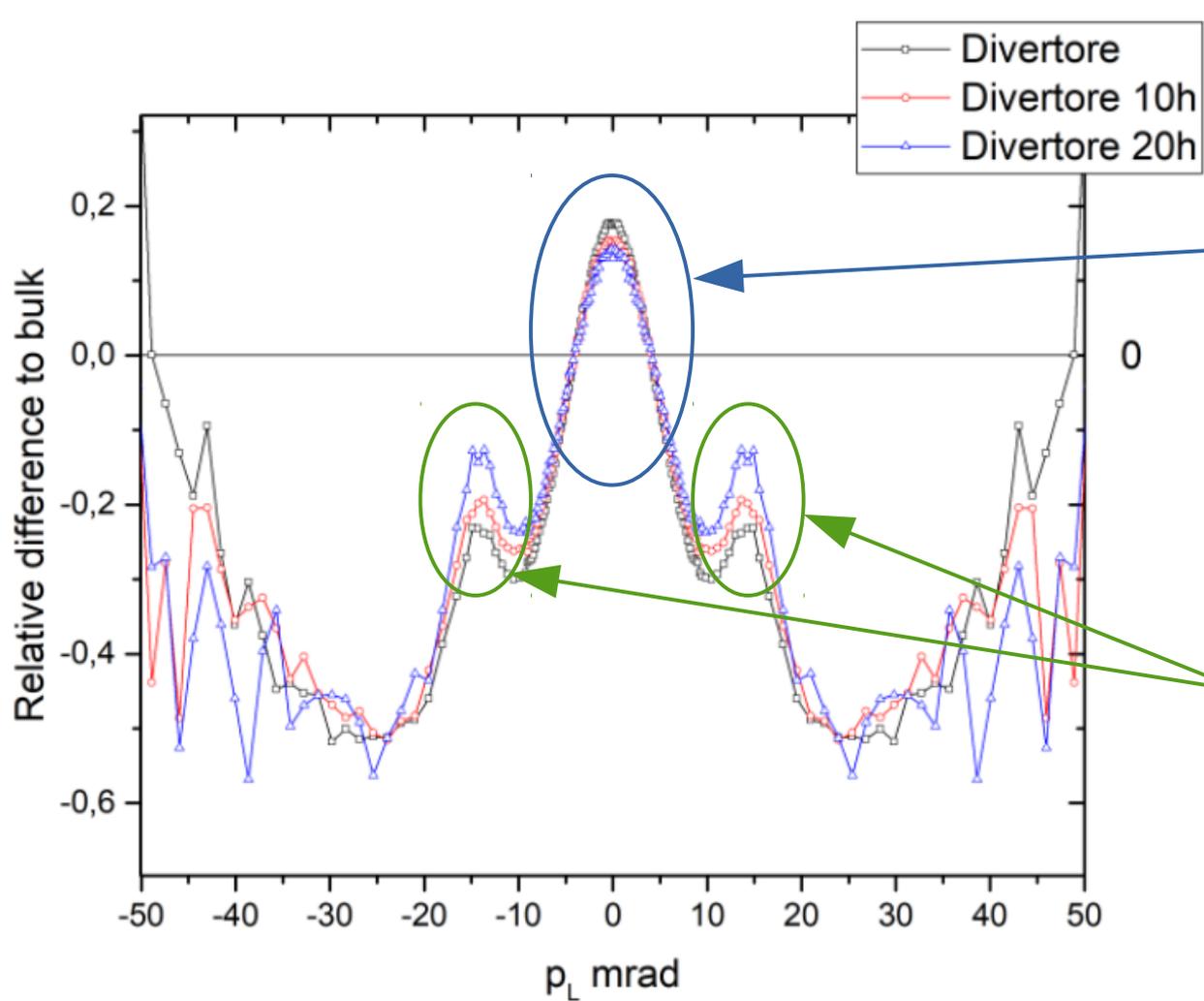
# Risultati misure con tecnica CDB: tungsteno del divertore



Massimo relativo a basso momento

Picchi di localizzazione:

# Risultati misure con tecnica CDB: tungsteno del divertore



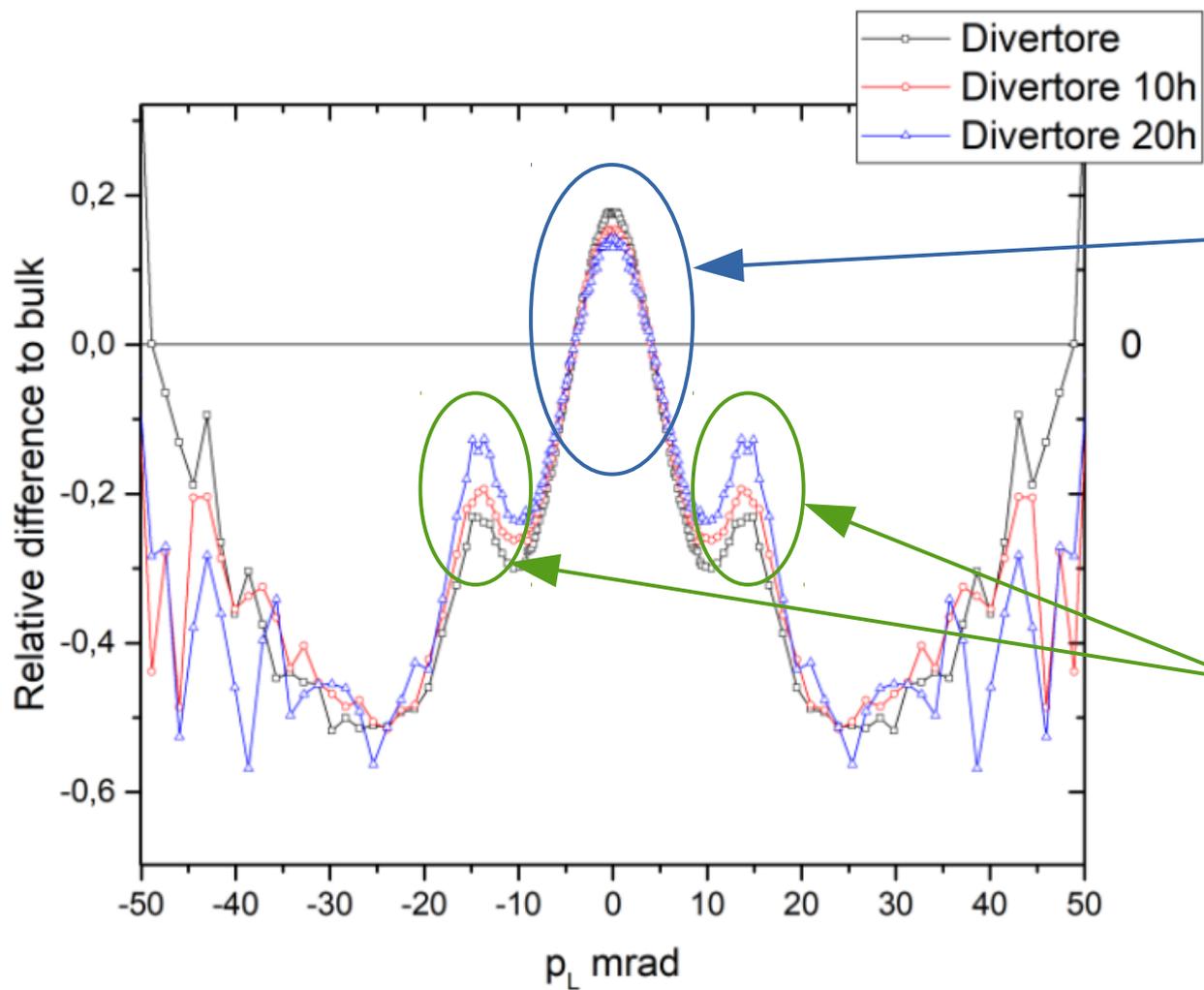
Massimo relativo  
a basso momento

Picchi di localizzazione:

Aumento con tempo  
irraggiamento

L'irraggiamento  
aumenta i difetti

# Risultati misure con tecnica CDB: tungsteno del divertore



Massimo relativo  
a basso momento

Picchi di localizzazione:

Aumento con tempo  
irraggiamento

L'irraggiamento  
aumenta i difetti

NOTA: Massimi e code più pronunciati nei grafici del tungsteno del divertore

Concentrazione dei difetti maggiore rispetto al tungsteno monocristallino

# Conclusioni

- Lo studio del tungsteno del divertore evidenzia la presenza di difetti di tipo mono-vacanza, clusters e dislocazioni
- L'irraggiamento elettronico aumenta la concentrazione di mono-vacanze, mentre tende a diminuire quella di clusters
- La concentrazione di difetti del tungsteno del divertore è maggiore che nel tungsteno monocristallino di riferimento
- Confinamento di  $e^-$  ed  $e^+$  in vacanze in corso di studio

# Conclusioni

- Lo studio del tungsteno del divertore evidenzia la presenza di difetti di tipo mono-vacanza, clusters e dislocazioni
- L'irraggiamento elettronico aumenta la concentrazione di mono-vacanze, mentre tende a diminuire quella di clusters
- La concentrazione di difetti del tungsteno del divertore è maggiore che nel tungsteno monocristallino di riferimento
- Confinamento di  $e^-$  ed  $e^+$  in vacanze in corso di studio



Il principale effetto dell'irraggiamento elettronico sul tungsteno (sia monocristallino che del divertore) è l'aumento di difetti di tipo mono-vacanza. Al fine di studiare la validità del tungsteno per l'utilizzo per il divertore sono necessari altri studi complementari.

# Conclusioni

- Lo studio del tungsteno del divertore evidenzia la presenza di difetti di tipo mono-vacanza, clusters e dislocazioni
- L'irraggiamento elettronico aumenta la concentrazione di mono-vacanze, mentre tende a diminuire quella di clusters
- La concentrazione di difetti del tungsteno del divertore è maggiore che nel tungsteno monocristallino di riferimento
- Confinamento di  $e^-$  ed  $e^+$  in vacanze in corso di studio



Il principale effetto dell'irraggiamento elettronico sul tungsteno (sia monocristallino che del divertore) è l'aumento di difetti di tipo mono-vacanza. Al fine di studiare la validità del tungsteno per l'utilizzo per il divertore sono necessari altri studi complementari.

## Grazie per l'attenzione